

第7章 低炭素循環型社会における材料

1 概要

本章では、我が国の目指す持続可能な社会における材料の在り方について検討する。資源の少ない日本のあるべき姿としての循環型社会、ならびに地球規模での取組みが望まれる低炭素社会という2つのターゲットにおいて、材料に関する考察は中心課題の一つと考えられる。ここでは、循環型社会の枠組みとそこから浮かび上がる課題、ならびに低炭素社会構築のための技術的条件の検証を試みる。

2 低炭素社会

2.1 温暖化とポスト京都議定書

21世紀に入り、大規模気候変動の兆候はますます明らかになってきた。気候変動に関する政府間パネル（IPCC）は第4次報告書の中で、気候システムの異変は温室効果ガス、特に二酸化炭素の増加が主原因であるとこれまでの報告より強く指摘し、

表1 IPCC 第4次評価報告書統合報告書

主題1 気候変化とその影響に関する観測結果
・気候システムの温暖化には疑う余地がなく、大気や海洋の全球平均温度の上昇、雪氷の広範囲にわたる融解、世界平均海面水位の上昇が観測されていることから今や明白である。
・地域的な気候変化により、多くの自然生態系が影響を受けている。
主題2 変化の原因
・人間活動により、現在の温室効果ガス濃度は産業革命以前の水準を大きく超えている。
・20世紀半ば以降に観測された全球平均気温の上昇のほとんどは、人為起源の温室効果ガスの増加によってもたらされた可能性がかなり高い。
主題3 予測される気候変化とその影響
・現在の政策を継続した場合、世界の温室効果ガス排出量は今後二、三十年増加し続け、その結果、21世紀には20世紀に観測されたものより大規模な温暖化がもたらされると予測される。
・分野毎の影響やその発現時期、地域的に予想される影響、極端現象の変化に伴う分野毎の影響など、世界の気候システムに多くの変化が引き起こされることが具体的に予測される。
(政策決定者向け要約のポイントより抜粋)

表2 低炭素社会の定義

- ・社会に属する全てのグループの発展へのニーズが満たされることを保障しつつ、持続可能な発展の原則と整合的な行動をとる
- ・温室効果ガスの大幅削減を通して、大気中の二酸化炭素やその他の温室効果ガスの濃度を、危険な気候変動を回避することのできる水準に安定化させるための世界的な努力に対して、公平な貢献を行う
- ・高いレベルの省エネを実証し、炭素排出の低いエネルギー資源と製造技術を使用する
- ・低いレベルの温室効果ガス排出と整合的な消費と行動パターンを採用する。

(日英共同研究・2050 脱温暖化プロジェクト)

その影響が自然生態系全般へ及ぼす結果が明白であると結論付けている。

この報告書では 100 年後には平均気温が現在よりも 2.4～6.4℃ 上昇することを予測し、それに伴う様々な影響に対するシミュレーションが行われた。これらの報告と連携を取りながら、気候変動に関する国際連合枠組条約（UNFCCC）が締約国会議を開き、京都議定書を基軸とする国際的な取り組みが進められている。紆余曲折を経て 2005 年に発効されたこの京都議定書は 2008～2012 年に約束期限を迎え、最初の審判を受ける日が近づいている。

さらに国際社会は次の目標であるポスト京都議定書の枠組みを模索しているが、途上国をその枠組みに巻き込む必要性もあり、調整はより一層難航しているのが現状である。

そのような中、低炭素社会という概念が近年登場した。その起源はイギリスと言われており、明確で詳細な定義の統一はまだ存在していないが、現在では日本政府をはじめ、各方面で頻繁に提唱され、2007 年日英低炭素社会ワークショップでは表のようにまとめられている。

2.2 二酸化炭素削減の取り組み

低炭素社会においては、大気中の温室効果ガス、特に二酸化炭素を中心に削減していくことが求められている。

制度の視点からは、まず京都議定書による先進国の排出削減義務の明記など、国際的な協定づくりが一番に挙げられる。締約国は様々な形で削減努力を重ねることが義務付けられるが、参加国の思惑が錯綜する中、ここには京都メカニズムと呼ばれる柔軟性をもった措置が導入された。このメカニズムは共同実施（JI）、クリーン開発メカニズム（CDM）、排出量取引（ET）に分けられ、他国の削減量を自国の削減量に読み替えることを可能にした制度である。また京都メカニズムの具体的運用が決定される過程で、森林吸収源の換算も削減枠として大幅に認められることになった。これら

は実質削減を阻害する要因であると批判されることも多いが、賛否はともあれ、すでに運用が開始されている。

実質的な削減のためには、リサイクル制度の確立、環境認証制度の導入、NGOを中心とする民間の取り組みの促進などが必要であり、それぞれ3Rイニシアチブ、ISO 14000、グリーンコンシューマー運動など、持続的な活動とそれを支える制度作りが求められている。

また技術の視点からは、主要エネルギー源を化石資源から新しいエネルギーへ転換する研究がメインストリームであるといえる。現時点では、すでに大規模利用が可能な原子力エネルギーが、温室効果とは別次元の異なる危険性を内包することを指摘されながらも、世界各国で拡大し続けている。もちろんその一方で、太陽光、太陽熱、風力、地熱などの自然エネルギーへの積極的な研究開発と推進政策が、特にデンマーク、オランダなどの北ヨーロッパを中心に進められている。また化石資源の使用を極力減らし、二酸化炭素排出を抑制することは、カーボンニュートラルの概念とも密接につながり、それゆえ、バイオマスエネルギーの可能性も大いに検討されている。その他、省エネや高効率化の技術開発、二酸化炭素除去技術など、機能材料分野でも今や環境調和型であることは新規材料開発の必要条件の一つと考えられていると言えよう。

以上の経緯から、本研究では「材料」に焦点を当てて検討を進めていく。すでに我が国が目指すべき社会像として国を挙げて提唱している「循環型社会」は紛れもなく材料の扱い方が重要になってくるからである。そこで次の第3,4節では3Rを中心とする循環型社会の概念とその課題を、汎用材料のライフサイクルの検討をもとに議論する。続く第5節では、本稿のテーマである「低炭素循環型社会」構築をにらみ、二酸化炭素削減を意識した未来材料設計について取り上げ、議論を深める。

3 循環型社会

3.1 我が国の目指す循環型社会

我が国では20世紀後半からの高度経済成長により、廃棄物の排出量が右肩上がり増大することになった。これにより、1990年代には最終処理場の逼迫が明らかになり、廃棄物抑制の必要性が強く認識されることとなった。同時に世界規模で資源問題、環境問題への関心が高まり、資源と廃棄物について改めて見直す機運が高まった。これらの状況の中、2000年に循環型社会形成推進基本法が制定され、循環型社

会構築への第一歩が始まった。その第 2 条において、「循環型社会とは、製品等が廃棄物となることが抑制され、並びに製品等が循環資源となった場合においてはこれについて適正に循環的な利用が行われることが促進され、及び循環的な利用が行われない循環資源については適正な処分が確保され、もって天然資源の消費を抑制し、環境への負荷ができる限り低減される社会をいう」と定義されている。この法律は従来の廃棄物処理法などによる個別対応だけでは、製品の出口における処理が複雑化し、追いつかなくなってきた現状を解決する目的をもつものである。そのため、環境基本法に対しては下位に、そして廃棄物・リサイクル対策に関する個別法に対しては上位法としての役割を持つという位置づけになっている。ただし、それら下位の関連法はすでに施行されているものもその傘下に入れるという形態を取っているため、十分な連携が取れていないという指摘もある。

いずれにしても 21 世紀に向けて我が国は循環型社会の推進を標榜し、この基本法の下、同年に循環型社会形成推進基本計画（循環基本計画）を策定することが規定された。それに基づき、2003 年に第 1 次循環基本計画、さらに 2008 年に第 2 次循環基本計画が閣議決定され、現在に至っている。2010 年は同 2 次計画の進捗状況の第 2 回点検が行われ、重点的点検事項として、[1] 3 つの社会（循環型社会、低炭素社会、自然共生社会）の統合的取組の状況、[2] 地域循環圏の形成を踏まえた循環型社会づくり等に向けた地方公共団体・NGO/NPO による取組、[3] 物質フロー指標や取組指標の定量的な把握・評価の 3 点が挙げられた。

本章のテーマでもある循環型社会と低炭素社会との統合に関する考察は、まさに国家プロジェクトとして推進されている重要課題であることがうかがえる。

3.2 資源と廃棄物

20 世紀の日本社会では、「大量生産・大量消費」経済の流れの中、多くの資源が「採掘→投入→加工→使用→廃棄」という一方通行型で廃棄物となっていた。これにより、廃棄物の発生量は増大し、また最終処分場の確保が困難になるなど、様々な問題が噴出することとなった。そこで廃棄物の中でも有用なものを循環資源と規定し、最終処分廃棄物をできる限り減らし、環境への負荷を低減する必要性を強調することになった。前出の循環型社会形成推進基本法においては、循環資源については、再使用可能なものについては再使用を義務付け、再使用が困難な場合でも再生利用が可能なものについてはその履行を、さらにそれらがともに不可能な場合で熱回収が可能なものは熱回収をすることとされている。以上のような循環的な利用が行われない

場合にのみ、最終処分にまわすという立場をとっている。

3R（リデュース、リユース、リサイクル）という用語については、近年広く浸透してきている。しかしこの概念には優先順位があること、すなわち循環資源の利用の基本原則に歩調を合わせて、リデュースが最優先、続いてリユース、最後にリサイクルと位置付けられていることを理解している一般市民は少ない。それどころか、リサイクルは狭義と広義の2種類の意味が混同して使われており、このことがリサイクル行政をわかりにくくしていることの要因であると考えられる。もちろん、専門家やリサイクルに意識の高い一部の市民の間では、分別回収、ごみの有料化、循環資源利用などについて熱心な議論がなされているが、これらの議論が一般市民に浸透しているとは言い難い。これは循環型社会の中核に3Rを据えるという現状において、大きな課題を提示しているといえる。

特に1990年代に顕在化してきたプラスチック廃棄物に関しては、埋立地への高負担、有害化学物質発生の懸念、化石資源由来、燃焼による二酸化炭素排出など、課題が山積しており、現在も継続審議中である。使用済みプラスチック素材が廃棄物となるか、資源として再利用できるかを巡っては多くの意見が出され、かつその方策が模索されている。プラスチック素材は軽量、易加工性などの特徴を持ち、各方面で多用されているが、中でも容器包装分野においては重要な部分を占めている。また環境省による調査では、一般ごみのうち、重量にして2割、容量にして6割¹⁾が容器や包装によるごみであることが明らかになった。

3.3 容器包装リサイクル法

これらの事態を受け、容器包装リサイクル法は循環型社会形成推進基本法に先立ち、1997年から施行が開始された。前述の理由により、家庭から排出される一般廃棄物のうち、特に容器包装廃棄物のリサイクルシステムの構築が急務になったからである。この法律は、それまで市町村のみに処理責任を負わせてきたシステムを改め、アクターを消費者、市町村、事業者の3者と規定し、それぞれの責任を明確にしたことが特徴である。すなわち、消費者には分別排出を、市町村には分別回収を、そして事業者には再商品化を、それぞれ義務付けることとした。

この結果、分別回収を実施する市町村は大幅に増加し、特にペットボトルの収集自治体は1997年当時20%を下回っていたものが、2006年には90%¹⁾を超えるに至った。それに伴い、資源回収量も着実に増加してきている。さらにリサイクル率そのものにも改善がみられ、一定の成果をあげたことがわかる。しかし、依然として家庭か

ら排出される一般廃棄物量は高止まりであり、また全廃棄物に占める容器包装廃棄物の割合も相変わらず6割である状況は改善されていない。そのため、より効果的な成果を得るため、2007年に改正容器包装リサイクル法が施行されることになった。この改正法は、(1)容器包装廃棄物の3Rの推進、(2)リサイクルに要する社会全体のコストの効率化、(3)国、自治体、事業者、国民等すべての関係者の連携、の3点を意識している。特に(3)については普及活動の取り組みが積極的に検討され、具体的には事業者の定期報告や3R推進マイスター制度²⁾、市町村への資金拠出制度などを新たに導入する形で展開されている。

また部分的ながら日本の法律では初めて明確に拡大生産者責任(EPR)³⁾を取り入れたことも重要であるとされている。生産者が製品の生産・使用段階だけでなく、廃棄・リサイクル段階まで責任を負うという、この考え方はOECD(経済協力開発機構)が提唱し、ヨーロッパでは広く取り入れられている。しかし、循環型社会基本法におけるEPRの組み込み方は、産業界への配慮が大きく、その実効性を疑問視する声も多い。

4 材料と現代社会

4.1 現代の汎用材料

これまでに述べてきたように「大量生産、大量消費、大量廃棄」型社会の到来で多くの資源が消費され、廃棄物となって我々にのしかかってきた。特に20世紀前半に発明された合成高分子材料は石油化学工業の発展とともに瞬く間に広がり、わずか50年で現代生活に欠かすことのできない材料となった。合成高分子材料は第二次世界大戦前にカロザースがナイロンの合成に成功した時から本格的に研究開発が始まったという、歴史的には新しい素材である。まずは天然繊維に代わる強くて加工のしやすい合成繊維として発展し、次いでいわゆる合成樹脂(プラスチック)と呼ばれる汎用素材としてあらゆる分野へと進出していったのである。その理由には20世紀の後半に原料となる石油資源の大量採掘が本格化したこと、高分子材料そのものの性質として、材料機能を規定する構造を分子設計段階から制御可能であったこと、さらに複合材料として用いることが容易で、適材適所で材料化できたことなど、多くの要因が挙げられる。

プラスチックの2008年種類別生産量構成(重量比)⁴⁾を見ると、ポリエチレン、ポリプロピレンがともに287万トン、ポリ塩化ビニルが180万トン、ポリスチレンが87

万トンと続き、これら熱可塑性樹脂だけで90%近くを占めている。これらは易加工性、難燃性、絶縁性、軽量性など、多くの優れた特性を持ち、汎用プラスチックと呼ばれている。フィルム・シート類、機械・器具部品、パイプ・取手、容器など、産業部門、民生部門を問わずあらゆる製品に用いられている。特に容器包装の分野では、大きくシェアを伸ばし続け、またそのことが廃棄物処分地における諸問題を誘発する原因となった。

たとえば最近の清涼飲料容器として使用されている材料はポリエチレンテレフタレート（PET）が圧倒的で、1990年頃には20%であったものが、2000年には50%⁵⁾を超え、現在でもほぼ同様の勢いで増加し続けている。しかし、これは販売側にとってはコスト面では決して有利ではなく、むしろPETボトル飲料は利益率が低い事実⁶⁾がある。しかし消費者の嗜好が需要を後押しし、この分野では薄利多売の事業を展開する傾向にある。これによりさらにPETボトル使用が増加するという悪循環が起きているのである。

4.2 我が国におけるプラスチックフローとその課題

プラスチック製品の生産から処分までの状況を表3に示す。これによるとプラスチック生産量は2004年から2007年までほぼ同じくらいの値を維持している。2008年に100万トン以上落ち込んでいるのは世界同時金融危機による影響である。これに対して廃プラ総排出量はこの5年間でほぼ横ばいとなっている。

2008年度について検討⁷⁾を深めると、この廃プラのうち、有効利用されているものは758万トン（76%）で、その内訳は図1に示すようにマテリアルリサイクルが214万トン（21%）、ケミカルリサイクルが25万トン（3%）、サーマルリサイクルが518

表3 プラスチック製品の生産・消費・廃棄処理量〈単位：万t〉
（プラスチック処理促進協会 2009年資料）

年	樹脂 生産量	国内 消費量	廃プラ 総排出量
2004	1446	1136	1013
2005	1451	1159	1006
2006	1445	1120	1005
2007	1465	1103	994
2008	1345	1089	998

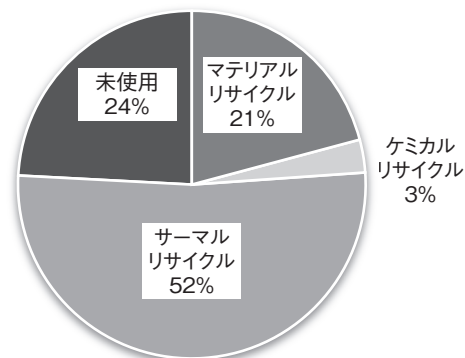


図1 2008年リサイクル種別

万トン (52%) となっている。前年度と比較すると廃棄物発電の増加により、サーマルリサイクルが 3% 延びたことが特記されている。

廃棄物発電は、廃棄物焼却に伴い発生する高温燃焼ガスによりボイラーで蒸気を作り、蒸気タービンで発電機を回すことにより発電するシステムに代表⁸⁾されるものである。この導入によって、(1) 発電に伴う二酸化炭素の追加的な環境負荷がない、(2) 新エネルギーの中では連続的に得られる安定電源である、(3) 発電規模は小さいが電力需要地に直結した分散型電源である、などの利点が得られるとされている。一方で、(1) 廃棄物を焼却する際に発生する塩化水素ガスなどによる金属腐食から蒸気条件を上げることができないため、発電効率が低い、(2) 廃棄物焼却処理に伴い発生するダイオキシン類の排出が懸念される、(3) 焼却灰の減量化の必要性が生じる、などの課題も挙げられている。2009 年の最新資料⁷⁾によると、廃棄物発電に使われた廃棄物は 2008 年から 64 万トン増加の 353 万トンと試算されている。

これは東京二十三区清掃一部事務組合 (清掃一組) が廃プラスチックのサーマルリサイクル (廃プラサーマル) を本格実施⁹⁾したことも主要な影響のひとつとみられる。清掃一組では 2006 年から廃プラサーマルの実証実験を進め、可燃ごみ中の廃プラスチック量が全工場平均で約 13% 程度に落ち着いてきたこと、高温焼却になることによる炉への影響は大きく出ていないことなどを公表してきた。また廃プラサーマルが行われる以前の 2005 年度と比較すると、総発電量が 9.9 kW/h から 10.3 kW/h へ増加し、埋め立てごみ量が 83 万トンから 46 万トンに減少し、その効果が得られていると主張¹⁰⁾している。しかし一方で青木¹¹⁾は「循環型社会も温暖化抑制もごみ発電では不可能」と、廃プラ焼却に真っ向から異を唱えている。その理由として、ごみの分別資源化の流れに逆行するものであり、基本方針に反するものであるということをもまず一番に挙げている。また埋立処分場の延命という最大の理由に対しては、焼却以外の方策の検討こそ第一にすべきであること、二酸化炭素発生量は増加していないという説明に対しては、計算手法に疑念があることなど、数々の問題点を指摘している。青木の指摘を待つまでもなく、サーマルリサイクルは、熱源として一度利用できるだけで、本来の意味でのリサイクルではないため、あくまでも他のリサイクルの補完的手段として位置付けられていることはすでに基本計画では再三確認されていることである。それにもかかわらず、清掃一組の資料からは廃棄物発電のメリットのみが前面に出ている論調となっている。

一方、名古屋市も 2011 年から容器包装以外のプラスチックの回収において、不燃ごみ扱いから可燃ごみ扱いへ移行するとの発表¹²⁾があった。それまで名古屋市環境

局では、国に対して容器包装以外のプラごみのリサイクルとその資源化に関する提案を行ってきたが認められず、日本容器包装リサイクル協会（容リ協）との交渉も実らなかったという経緯¹³⁾がある。名古屋市では可燃ごみへの移行対策は理念上、ベストな選択ではないとしながらも、ゴミにプラスチックを混ぜることで生じる発電効率の上昇や収集コストの減少などのメリットを伝え、市民の理解を得るとともに、資源化率向上への取り組みも引き続き啓発していきたいと発言している。

これらの事実から、行政の現場ではコストや処分場の現実に対処することと、循環型社会の基本理念を具体化していくことミスマッチングが生じていることが明らかである。それどころか名古屋の事例のように、理念追求への提案に対してすら、現行制度の課題から国がその推進を拒否するという矛盾が生起しているのである。このことはリサイクル制度そのものの深刻な課題とみなせる。

4.3 PET ボトルリサイクルに対する制度的課題

プラスチック処理促進協会の2009年資料によると、マテリアルリサイクルの2008年内訳は使用済み製品が128万トン（59.9%）に対し、生産・加工ロス品が86万トン（40.1%）となっていた。使用済み品の由来分野としてはPETボトルが48.5万トン（37.9%）と最も多く、次いで包装用フィルム22.3万トン（17.4%）となっている。

このことから、我が国ではPETボトルのリサイクルが最も普及していることが見て取れる。プラスチックの中でもPETは清涼飲料ボトルとしての普及と相まって急速に生産量が増加してきた。またPETボトルは比較的単純な材料構成であり、分別回収という手段が有効であるとの見方から、その取り組みが積極的に行われてきた。図2に示すように容リ法が施行された1997年には10%未満であった回収率はその10年後に70%近くにまで上昇し、2008年には80%に迫る勢いである。2005年から回収率の算定基準が変更になり、それ以前より低く見積もられることになったので、同一基準では約十年で回収率は8倍になったともいえるのである。この値は回収率の国際比較においても最高水準であることが図3から明らかである。この10年間、米国がほぼ横ばいで25%程度を示してきたのに対し、2000年度以降は米国を抜き、さらに2005年以降、一貫してヨーロッパの1.5倍にあたる回収率を誇っている。これは循環型社会基本法に定めたリサイクル社会としての方向性を具現化している一つの形であると評価されている。

しかし、4.2節でも示したように、その中身はまだまだ課題が山積している。市町

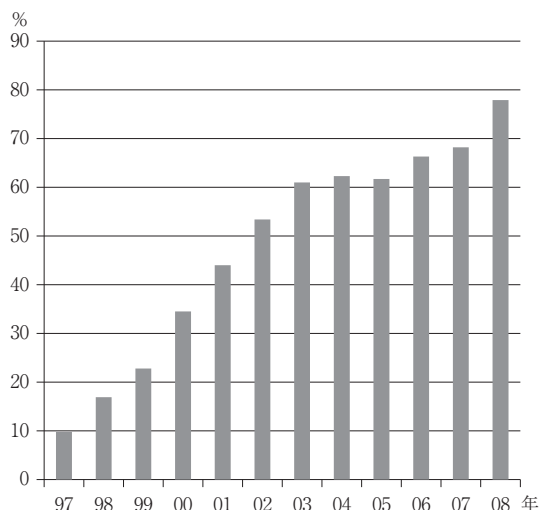


図2 PET ボトルの回収率
(PET ボトルリサイクル推進協議会 2009 年度資料)

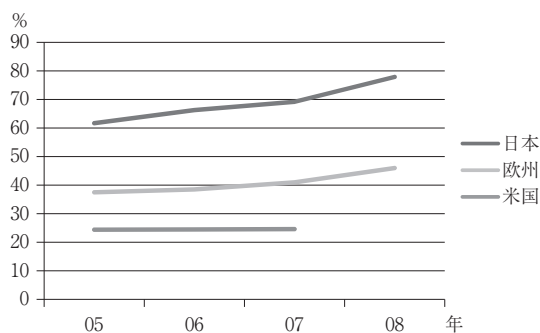


図3 PET ボトル回収率の日米欧の比較
(PET ボトルリサイクル推進協議会 2009 年度資料)

村の分別回収割合は約 50% であり、これら分別回収された PET ボトルは原則、指定法人（日本容器包装リサイクル協会）ルートをとって処理される。指定法人ルートでの再商品化の入札は再商品化事業者が指定法人から費用を受取り、再商品化を受託する方式（いわゆる逆有償入札）が基本であるため、市町村には処理量に応じて、新たに金銭的負担が生じる。国内循環システムの構築を優先する理念が掲げられた容リ法施行当初から時を経て、海外、特に香港や中国からの積極的な有償取引が求められるようになった 2004 年頃からは、この負担軽減のため、独自処理ルートへ流れる PET ボトルが増加し始め、2007 年には独自処理量がついに市町村処理量の半数を超える¹⁴⁾ ことになった。

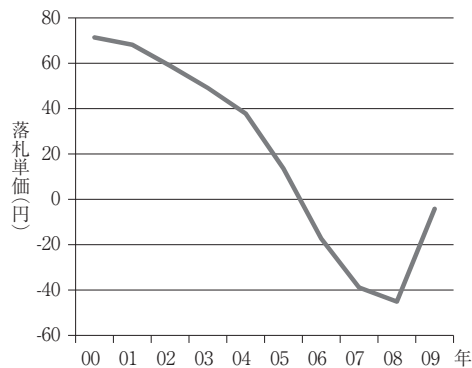


図4 指定法人の落札単価の推移
(PET ボトルリサイクル推進協議会 2009 年度資料)

通常マテリアルリサイクルは手間やエネルギーがかかるため、現段階では化石原料由来のバージン PET 材料に比べて高価でかつ品質が劣るという不利な状況になっている。にもかかわらず廃 PET ボトルを取り巻くこの状況により、指定法人ルートにおける落札価格は年々低下し、図4に示すように2006年にはついに落札単価がマイナスに転じるという事態に陥り、事業としての採算ベースを大きく割り込むことになってしまった。このことにより国内リサイクルシステムは事実上崩壊寸前の状態となっている。このあおりを受けて、技術的には画期的とされたケミカルリサイクルによるボトル To ボトルシステム¹⁵⁾の完全リサイクル製品を製造する会社が倒産するという事態にまで発展した。この会社の開発した技術はアイエス法と呼ばれる原料化技術で、プラスチックをいったん原料に分解し、バージン材料と同品質のプラスチックが製造できるという手法である。現在、国内大手容器メーカーがこの会社を再生させ、この貴重な技術（PRT 方式と改名）と事業化の継承を行っているが、現時点では採算をとれるところまでいっていない。

しかしそのような中、2008年9月にリーマンショックに端を発した世界同時金融危機の影響で、旺盛だった廃 PET 材料の輸出が大きく落ち込むことになった。図4において、2008年から2009年にかけて落札単価が大きく逆方向に振れているのはこの影響による。これにより廃 PET ボトルはだぶつき、国内市場への回帰が探られたが、当然ながら国内システムはそれを定常的に受け止められる態勢になく、一時リサイクル市場が混乱する事態に陥った。

本研究を進めるうえで資料調査、および聞き取り調査を行い、PET ボトルをめぐるリサイクルシステムの現状の把握に努めた結果、市場原理主導による中国への輸出

偏重で国内資源循環システムの脆弱化がもたらされた構造が明白になった。現行制度では事実上独自ルートを規制するインセンティブが働かず、国内リサイクルシステムの構築からは程遠い制度設計であるといえる。市町村回収ルート以外の事業系回収ルートでは総じて品質が担保されず、リサイクルコストも見合わない状態である。金融危機直後の混乱を契機として国内システムの立て直しを模索する動きも一部で見られたが、その動きが本格化する前に中国の驚異的な回復力で輸出量も半年以内に以前と同水準に回復して、抜本的な改革を断行するに至っていない。

加えて、官公庁が発表している各種資料や研究者による論文などを精査すると、ケミカルリサイクルの視点が専門家の間でも不十分であることが明らかとなってきた。確かに現時点でケミカルリサイクルはリサイクルのうちの 3% しか占めておらず、市場規模ではマイノリティにすぎない。ただし素材を PET に限れば、我が国は廃 PET ボトルを再生 PET ボトルに戻すという、いわば理想的な循環材料に戻せる、世界でも類を見ない技術を持ち、バージンペットボトルと同等の品質に戻すことのできる手法はこのケミカルリサイクルでしかあり得ない。しかもこの技術はエネルギー消費量も少ない環境対応型技術であるとされている。これに対して通常のマテリアルリサイクルでは、再生利用されるとはいえ、PET ボトルは他の製品、多くは下位の性能をもつ製品になるのである。これは再商品化の出口用途の需給関係から考えても優位とはいえない。それにもかかわらず、経済産業省・環境省の発表した『プラスチック製容器包装の再商品化手法および入札制度の在り方に係る取りまとめ（案）』報告書¹⁶⁾には、「現時点で、プラスチック製容器包装の再商品化手法としては、緊急避難的・補完的に利用する場合を除き、ケミカルリサイクル手法を 4 つに細分化（高炉還元剤化法、コークス炉化学原料化法、ガス化法、油化法）すると材料リサイクル手法と合わせて 5 つの手法がある。」となっている。すなわち制度設計側にすら、循環型社会の命運を握るケミカルリサイクルによる完全循環材料の視点が欠落しているのである。このような認識は当該手法について論じている文献以外では同様の傾向が見られることがわかった。4.2 で指摘したサーマルリサイクルへの対応と合わせて考えると、制度設計の基本理念と現実認識がかい離している不幸な状況であると言わざるを得ない。

5 持続可能な材料設計

5.1 環境調和型材料の条件

環境省は「低炭素社会の実現に向けた脱温暖化 2050 プロジェクト」と題して、2004 年から 5 年をかけてプロジェクトチームを発足させ、2050 年に温室効果ガスである二酸化炭素を 90 年比 70% 削減する可能性を検討した。ここではバックキャスティング法と呼ばれる、達成目標からさかのぼって各段階で何をなすべきかを検討する手法を用いてこの可能性を検討し、将来のサービス需要を満足しながら 70% という数値を達成する技術的なポテンシャルが存在すると結論付けている。

そのプロジェクトの中で、「低炭素社会に向けた 12 の方策」を提言している。表 4 に掲げる方策のうち、4 や 10 については、環境調和型材料として検討するバイオマス材料そのものが戦略の一つになる。1, 2, 8, 9 においては製品や環境性能を支えるための材料研究がこれらの方策を支える要の一つとなることを明らかにしている。また 5, 6, 11 は技術をスムーズに導入するための仕組みづくりの必要性が強調されるものである。

このように、21 世紀に入って材料の扱い方、また材料の在り方は環境調和性を考えることなしには成り立たなくなっている。これらを背景に我が国ではエコマテリアルという材料概念が提唱されるようになった。これは「資源」→「素材」→「廃棄」という流れ全体の中で物質を管理して、より少ない環境負荷でより優れた材料の特性を引き出し、使用する人々の快適さに役立てるものとして定義されている。これまでも環境影響評価（LCA）の手法を用いて材料の環境負荷の程度を議論する試みはなされているが、このエコマテリアルではもう一歩進めて、積極的に環境低負荷材料

表 4 環境省「低炭素社会に向けた 12 の方策報告書」より

- | |
|---|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. 快適さを逃さない住まいとオフィス 2. トップランナー機器をレンタルする暮らし 3. 安心でおいしい旬産旬消型農業 4. 森林と共生できる暮らし 5. 人と地球に責任を持つ産業・ビジネス 6. 滑らかで無駄のないロジスティクス 7. 歩いて暮らせる街づくり 8. カーボンミニマム系統電力 9. 太陽と風の地産地消 10. 次世代エネルギー供給 11. 見える化で賢い選択 12. 低炭素社会の担い手づくり |
|---|

を提案しようというものである。環境調和型材料設計のアプローチには次のようなものが考えられる。

1つは素材の構造を極限まで制御して、高効率素材を設計することである。これは高効率発電や超電導材料などへの展開が挙げられる。2つ目は高機能性を発現する材料設計である。特に炭酸ガスを選択的にキャプチャーする吸着膜、高機能光化学触媒などへの展開が挙げられる。3つ目は材料のローエナジーライフサイクル設計である。有害物質フリー、低環境負荷履歴、高リサイクル性能、高資源生産性の材料などの開発がこれにあたる。特に我が国のターゲットは低炭素循環型社会であるため、温室効果ガス低減の技術と連携しながら開発を進める必要がある。

5.2 バイオプラスチックの可能性

4節で検討したように、20世紀に圧倒的な勢いで普及した化石資源由来プラスチックは、現代社会に驚異的な利便性をもたらすと同時に、新たなタイプの廃棄物問題を生起させることとなった。この難題の検討の中、新たなプラスチック素材としてバイオプラスチックが注目されるようになってきた。日本バイオプラスチック協会（JBPA）では2つのコンセプトの総称¹⁷⁾としてこの用語を用いている。

一つ目は「通常の使用時にはプラスチックとしての性能・物性を保ち、使用后・廃棄時には微生物の働きにより分解し、最終的には水と炭酸ガスに変化するという機能の特徴から環境負荷低減が期待されるプラスチック」と定義される生分解性プラスチックである。

二つ目は「従来の石油化学によるプラスチックと異なり、再生が可能な有機資源を原料に、日常生活に利便性を与える有用なプラスチックを持続的に作ることにより、枯渇性の化石資源の使用縮減（地球温暖化防止）に貢献することが特徴のプラスチック」と定義されるバイオマスプラスチックである。これはカーボンニュートラルの観点からも注目されている。

今日の主要材料の一つであるプラスチックについて、盲目的に否定する前に、いかに環境適合性を発現させ、自然界の物質循環に組み込める素材とするかを模索することが重要であると考ええる。

その観点からは、まず一つ目の定義である生分解性プラスチックの検討が求められる。このプラスチックの分解性評価は、環境分解性、微生物分解性、酵素分解性、の3つに大別されるが、中でも酵素分解はその高い基質特異性から、ターゲットプラスチックを効果的に分解することが期待される。すなわちいわゆる「生体触媒」として

の酵素の有用性が次第に認められ、従来は「化学触媒」中心に発展してきた製造・加工業においても需要が伸びているのである。このことは、酵素の特性、ターゲットプラスチックの化学構造、結晶構造、表面構造などにより、分解速度の制御が可能となることが示唆している。実験室内での基礎研究における代表的な酵素分解試験として、重量変化測定、表面観察、強度測定、濁度測定、滴定、分子量測定などが丹念に行われている。

これまで筆者はこのような基礎研究の一環として、コラーゲンやゼラチンなどの天然ポリペプチドと類似の構造を持つ合成ポリペプチドに対して、タンパク質分解挙動を示すプロテアーゼ酵素である植物由来のプロメラインや、脂質分解挙動を示すリポタンパクリパーゼなどを作用させ、その分解挙動を研究^{18~21)}してきた。それにより適切な水溶性担体に酵素を修飾することで酵素-基質特異性を改善すること、すなわち分解特性を制御する可能性を見出しているが、この材料はまだ本格的な実用化には至っていない。

すでに生分解性材料として工業的にも広く展開されている材料はポリ乳酸である。ポリ乳酸はこの分野で圧倒的なシェアを占めているが、それでも世界における年間製造量²²⁾は14万トンとされ、世界の全プラスチック生産量と比較すると0.1%程度のシェアに過ぎない。これはコスト面での競争力不足の要因が大きいことが第一に挙げられる。研究レベルでの材料適性の優位性だけでは一般材料として普及せず、なんらかの制度設計による後押しが必要であることが、ここでも示唆される。

一方、二つ目の定義であるバイオマスプラスチックという視点に関しては、5-1節でも見てきたように低炭素社会における将来の有望材料に位置付けられている。我が国のバイオマス賦存量は3億1500万トンであると見積もられている。その大半が廃棄物系バイオマスであり、未利用分は7000万トン¹⁷⁾であるとされている。12の方策においても戦略的材料の位置づけにあるバイオマス資源であるが、大半は光合成反応を利用するという性質から「受光面積」が支配的で、それゆえ広く薄く分布するというエネルギー的には不利な特徴を備えている。加えて食糧問題とのバッティング、消費速度の問題など、検討すべき課題は多く残されている。

6 低炭素循環型社会構築に向けて

6.1 エコロジカル・モダナイゼーション論と社会的調整

ここまで既存プラスチック材料の急速な普及とそれに伴う廃プラスチック処理制度

に根深い構造的課題が存在することを指摘してきた。またカーボンニュートラル、環境負荷低減を念頭に置いたバイオプラスチックの可能性について言及してきた。本節では持続可能な社会構築に向けた材料戦略について、社会的調整の可能性を検討する。

社会的調整についての一つの理論である「エコロジカル・モダナイゼーション（エコロジー的な近代化）」論²³⁾はすでにヨーロッパ諸国で主に環境政策の指針として導入されている。我が国でもこの理論に関する政策的研究がおこなわれており、山田らは「日本産業社会の脱温暖化モデル構築に向けた調整様式」²⁴⁾としての可能性を検討している。

「エコロジカル・モダナイゼーションは、市場をベースとしつつも調整されたルールによって、社会を環境適合的に再統合させようとする論点を持つ」とする理論である。その代表例としては日本の産業界にも影響を与えた EMS (Environmental Management System) や ISO 14000's などの環境政策や規格化などが挙げられている。すなわち環境政策を後押しするための社会的な「調整」モデルを用意し、市場経済の中で目的を達成しようとするものである。山田らは脱温暖化モデル構築に関して「市民イニシアティブに基づく市場的調整の成果をひとまず専門家イニシアティブにより政治的調整の場に巻き込み、社会的に調整された目標を手段としてのスマートレギュレーションで表現することで、日本産業社会のシステムを環境パフォーマンスの目標にそって方向づけていく変化」が妥当であると結論付けている。ここでスマートレギュレーションとは、Janicke によって展開された、規制的手段を用いて市場的調整を環境配慮型に方向づける方法論²⁵⁾として知られている。

6.2 社会的調整と専門家イニシアティブ

この考え方をここまで述べてきたプラスチック材料の在り方に照らして検討してみる。まず現段階で PET ボトルをはじめとする廃プラスチック処理状況は市場の方向性に任せる限り、望ましくない方向に向かうことがわかっている。そのため社会的な「調整」が必要になるが、改正容り法ではその機能を果たせていないことは明白である。いまだに循環資源としてより、廃棄物としてのイメージが強い廃プラ市場で、いかにスマートレギュレーション型の前向きな競争を誘発できるかが課題となる。

またここまで明らかにしてきたような課題に対する市民イニシアティブに関しては、その育成を期待する以前の段階であり、正確な認識における分断状況が深刻である。容り法ではアクターを消費者、市町村、事業者の 3 者と規定し、それぞれの責任

を明確にしたことが最大の特徴であったと3-3節で紹介したが、そもそも一般市民が抱くリサイクルイメージと現行のリサイクルの在り方の不整合がはなはだしい。加えて廃プラの可燃ごみ化への流れは分別回収や資源化の理念とは逆行するもので、余計に混乱を招くことが予想される。

さらにPETボトルリサイクルのトップランナーであるはずのPRT方式（アイエス法）は、スマートレギュレーション型技術となりえるものであるが、このままでは望ましくない市場の調整に再度さらされてしまう恐れがある。バイオプラスチックもいまだいくつかの課題を抱えており、その可能性を発展させるために乗り越えるべき障壁は大きいのが現状である。

これらプラスチックの抱える問題を解決することなしに低炭素循環型社会構築はあり得ない。環境パフォーマンスの目的に沿った方向づけには、プラスチック材料設計の段階からリサイクル制度と連携させ、一貫した共通認識を作り上げる必要がある。残念ながら現段階では専門家イニシアティブすら発揮できる状況にないことが明らかになった今、早急に材料技術、法律、経済、政策立案の専門家を中心とした共同研究ならびに現実的整合性をもった理念の醸成が必要である。それをもとに広く情報を開示し、市民へのインタープリテーション、市場との協力を経て、ようやく専門家イニシアティブが威力を発揮することになる。有効政策を実施することにより多くの実りを得るための時間的猶予はもうあまり残されておらず、これら政策決定に関与する専門家に課せられた使命は大きいといえる。

（林 隆紀 はやし たかのり）

（神頭 成禎 かんとう よしただ）

〈引用文献〉

- 1) 環境省：3R 容器包装リサイクル法
<http://www.env.go.jp/recycle/yoki/index.html>
- 2) 3R 検定実行委員会編（2008）「3R 検定公式テキスト」ミネルヴァ書房、p 139
- 3) 環境情報普及センター EIC ネット：環境用語集
<http://www.eic.or.jp>
- 4) 石油化学工業協会年次統計資料：石油化学製品の生産
<http://www.jpca.or.jp/4stat/02stat/y1seisan.htm>
- 5) 政策科学研究所：2004 年容器包装ライフサイクルアセスメントにかかわる調査報告書
http://www.env.go.jp/recycle/yoki/c_3_report/pdf/h16_1ca_chousa_honpen.pdf#search='2004年容器包装ライフサイクルアセスメントにかかわる調査報告書'
- 6) 細田衛士（2008）「資源循環型社会」慶應義塾大学出版会、pp 55-58
- 7) 阪口修（2010）「廃プラスチックの処理」プラスチック、Vol.61, No.6, 2010, pp 71-73

- 8) 資源エネルギー庁：新エネルギーについて 6 廃棄物発電
<http://www.enecho.meti.go.jp/energy/newenergy/newene06.htm>
- 9) 山田正人 (2010)「焼却施設と最終処分場には経済の調整機能の役割がある」月刊廃棄物 2010 年 4 月, p 16-17
- 10) 東京二十三区清掃一部事務組合 (2010)「サーマルリサイクルという選択」月刊廃棄物 2010 年 4 月, p 12-15
- 11) 青木泰 (2009)「循環型社会も温暖化抑制もごみ発電では不可能」月刊廃棄物 2009 年 4 月, p 42-47
- 12) 東京新聞 2009 年 12 月 1 日記事
- 13) 小林靖弘 (2010)「容器包装以外のプラスチック 2011 年度から可燃へ」月刊廃棄物 2010 年 4 月, p 6-11
- 14) 窪田順平 (2009)「モノの越境と地球環境問題」昭和堂, pp 96-137
- 15) ペットリファインテクノロジー：リサイクルを支える技術
<http://www.prt.jp/technical/prt.html>
- 16) 経済産業省・環境省報告書 (2010)「プラスチック製容器包装の再商品化手法及び入札制度の在り方に係る取りまとめ」, 官公庁環境専門資料, Vol.45, No.5, pp 1-33
- 17) 日本バイオプラスチック協会編 (2008)「バイオプラスチック材料のすべて」日刊工業新聞社
- 18) 林隆紀, 淀谷真也, 古田雅一, 林壽郎 (2008)「合成ポリペプチド設計と生体材料としての応用 1」日本接着学会誌, Vol.44, No.4, 2008, pp 118-123
- 19) 林隆紀, 淀谷真也, 古田雅一, 林壽郎 (2008)「合成ポリペプチド設計と生体材料としての応用 2」日本接着学会誌, Vol.44, No.6, 2008, pp 200-206
- 20) 林隆紀, 淀谷真也, 古田雅一, 林壽郎 (2009)「合成ポリペプチド設計と生体材料としての応用 3」日本接着学会誌, Vol.45, No.3, 2009, pp 81-87
- 21) 林隆紀, 淀谷真也, 古田雅一, 林壽郎 (2009)「合成ポリペプチド設計と生体材料としての応用 4」日本接着学会誌, Vol.45, No.4, 2009, pp 124-129
- 22) 田平公孝, 新田明, 小島洋治, 宮崎克也 (2005)「ポリ乳酸の高性能化と自動車部品への応用」広島県立西部工業技術センター研究報告, No.48, 2005, pp 21-23
- 23) Mol, A. P. J., Sonnenfeld, D. A. (Eds.) (2000) "Ecological Modernization Around the World: Perspectives and Critical Debates", Frank Cass.
- 24) 山田修嗣, 藤井美文, 石川雅紀 (2007)「日本産業社会の脱温暖化モデル構築に向けた構成様式と政治的イニシアティブ」地球環境, Vol.12, pp 219-226
- 25) Janicke, M. "Governing Environmental Flows (2004) The Need to Reinvent the Nation State" 吉田文和他訳, 経済学研究, 北海道大学, Vol.54, 2004, pp 93-107